



Etude et conception d'un refroidisseur radiofréquence pour des faisceaux haute intensité

F. Duval

► To cite this version:

F. Duval. Etude et conception d'un refroidisseur radiofréquence pour des faisceaux haute intensité.
RJC 2006 - Rencontres Jeunes Chercheurs 2006, Jan 2007, Les Houches, France. in2p3-00174459

HAL Id: in2p3-00174459

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00174459>

Submitted on 25 Sep 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Table des matières

I	Nom de la session	3
	Florian DUVAL : <i>Etudes et conception d'un refroidisseur radiofréquence pour des faisceaux radioactifs de haute intensité</i>	5
1.1	Introduction	5
1.2	Le séparateur haute résolution	5
1.3	Les refroidisseurs radiofréquences	5
1.4	La conception	6
1.5	Conclusions-Perspectives	8

Première partie

Nom de la session



François
RABELAIS



Rabelais
FRANÇOIS

Etudes et conception d'un refroidisseur radiofréquence pour des faisceaux radioactifs de haute intensité

Florian DUVAL

Laboratoire de Physique Corpusculaire, Caen



Résumé

L'avènement de nouvelles installations telles que FAIR ou Spiral2 nécessitent d'importants développements expérimentaux. L'un des projets s'inscrivant dans le cadre de Spiral2 est DESIR pour "*Desintégrations, Excitations et Stockage d'Ions Radioactifs*"[1], une installation dédiée à des expériences à basse énergie. Les intensités attendues ($\approx 1\mu A$) seront bien plus importantes que celles disponibles actuellement ce qui requiert un effort important pour la préparation de faisceaux et notamment la construction d'un refroidisseur radiofréquence pouvant traiter ces courants.

1.1 Introduction

Historiquement, la connaissance de la structure nucléaire a d'abord été basée sur des mesures d'isotopes stables puis sur l'étude de noyaux radioactifs. Pour explorer le cas de systèmes toujours plus exotiques, il est nécessaire d'obtenir une quantité solide et importante de données expérimentales et de repousser les limites de la production, de la séparation et de la manipulation des faisceaux d'ions radioactifs.

Le projet DESIR sera une installation basse énergie au sens où les faisceaux utilisés n'ont qu'une énergie de l'ordre de quelques dizaines de kiloélectronVolt. Elle sera dédiée à des expériences telle que :

- Les mesures de masse
- Les expériences de spectroscopie laser
- Les études de la désintégration β

Ces expériences sont très exigeantes en terme de préparation de faisceaux notamment du point de vue de la pureté, les ions d'intérêt sont noyés dans une multitude de contaminants.

Dans une première partie, nous présenterons le séparateur haute résolution dont le refroidisseur radiofréquence est un des éléments. La seconde partie sera consacrée aux éléments de théorie et aux objectifs de ce dispositif. Enfin, nous nous intéresserons à sa conception.

1.2 Le séparateur haute résolution

Pour procéder à cette purification du faisceau, la solution envisagée est l'utilisation d'un séparateur haute résolution.

Ce séparateur magnétique doit absolument respecter deux contraintes primordiales :

- Il est nécessaire d'avoir un dispositif assurant une bonne transmission puisqu'on ne peut pas se permettre de perdre une trop grande partie des ions que l'on a difficilement produit.
- Il faut aussi assurer une bonne résolution en masse pour séparer en masse les contaminants jusqu'aux isobares de l'espèce d'intérêt (dans ce cas, la différence ne provient que des excès de masse atomique).

Ce séparateur haute résolution sera composé de deux dipôles magnétiques.

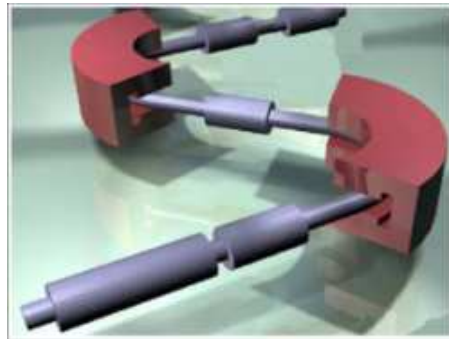


FIG. 1.1 – Schéma du séparateur haute résolution

Or, comme toute installation magnétique, pour que ce dispositif soit le plus performant tant en transmission et qu'en résolution, il faut que le faisceau soit le plus fin et le plus parallèle possible.

L'objectif de cette thèse est de développer le refroidisseur radiofréquence qui permettra de préparer le faisceau dans les conditions requises pour cette séparation.

1.3 Les refroidisseurs radiofréquences

L'objectif de cette partie est de présenter certains éléments de théorie sur les refroidisseurs radiofréquences et de mettre en lumière les performances à atteindre compte-tenu du faisceau à traiter.

1.3.1 L'émittance d'un faisceau

L'émittance d'un faisceau caractérise sa taille au travers de sa dimension physique mais aussi de sa divergence. L'objectif est d'en réduire sa valeur.

Cette grandeur s'exprime de la façon suivante :

$$\epsilon(\pi.mm.mrad) = \pi.\Delta x(mm).\Delta\theta(mrad)$$

avec :

- Δx est le rayon du faisceau
- $\Delta\theta$ est sa divergence par rapport à l'axe longitudinal (Oz sur la figure 1.2)

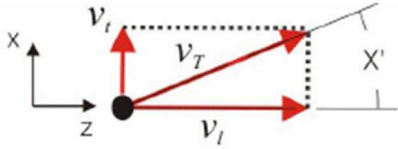


FIG. 1.2 – Divergence d'un faisceau

Dans les installations basses énergies telles que ISOLDE au CERN ou la ligne LIRAT du GANIL, l'émittance du faisceau est de l'ordre de quelques dizaines de $\pi.mm.mrad$. Cependant, pour atteindre les résolutions en masse nécessaires tout en ayant une bonne transmission, il est impératif de passer sous le seuil de 1 $\pi.mm.mrad$ [1], ce qui est difficilement atteignable avec la technologie actuelle des refroidisseurs [2].

1.3.2 Le principe de fonctionnement

Pour refroidir ces faisceaux, on injecte les ions dans du gaz léger, typiquement de l'hélium. Ils vont y subir une multitude de collisions, abandonnant à chaque fois une partie de leur énergie d'où le refroidissement. Après chaque collision, ils ont tendance à diffuser ce qui revient à une perte de faisceau et il est donc nécessaire de les confiner. Ce confinement est obtenu par l'intermédiaire de la structure quadrupolaire sur laquelle on applique une tension radiofréquence[3].

La structure quadrupolaire est composée de deux couples de barres segmentées qu'on polarisera avec un potentiel RF sinusoïdal en opposition de phase (fig 1.3). Lorsqu'un ion se dirige vers une électrode dont le champ est repulsif, il est ramené vers le centre ce qui le confine suivant une dimension. De plus, la fréquence du champ est choisie de telle manière que l'ion n'aura pas le temps d'atteindre le segment et sera rappelé vers le centre de la structure. En d'autres termes, cela revient à la formation d'un puit de pseudo-potentiel.

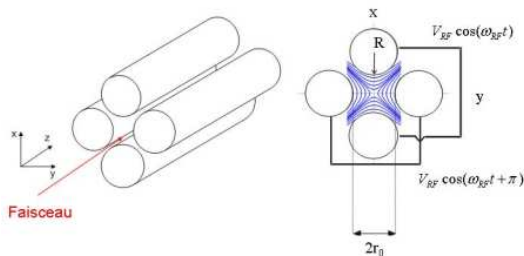


FIG. 1.3 – Le potentiel RF

L'addition de ce confinement et de ce refroidissement a pour résultat un amortissement du mouvement radial des ions (fig. 1.4).

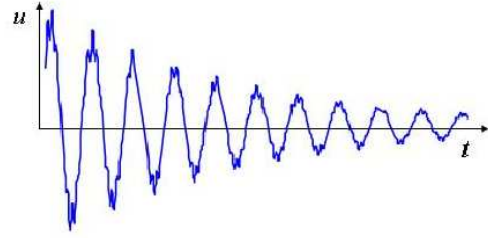


FIG. 1.4 – Amortissement du mouvement radial des ions

Aux pressions utilisées (quelques mbar), le refroidissement n'est efficace que pour des énergies de l'ordre de 100eV. Les ions sont extraits de la source avec une énergie de quelques dizaines de kiloélectronVolts : ils faut donc les ralentir électrostatiquement pour atteindre 100eV. L'ensemble du dispositif (enceinte à vide, électronique, pompe, etc...) est polarisé à un potentiel légèrement inférieur à la tension du faisceau. De plus, il est nécessaire d'avoir une électrode de décélération optimisée pour une injection efficace du faisceau ralenti dans la structure quadrupolaire [4].

1.3.3 La charge d'espace

Cette notion est liée au nombre de charge par unité de volume et à la repulsion coulombienne qui s'exerce entre elles. Ceci conditionne fortement le courant pouvant être traité par le dispositif et doit être considérée avec la plus grande attention. La densité maximale [5] que peut traiter un refroidisseur dépend du potentiel radiofréquence :

$$n \propto \frac{V^2}{r^2}$$

avec :

- V, l'amplitude du potentiel RF
- r, le rayon interne de dispositif

Les champs appliqués dans les refroidisseurs actuels sont de l'ordre de 10V/mm pour des courants de quelques 100 pA (ISOLDE, Spiral) [2]. Cependant, compte-tenu de l'intensité des faisceaux beaucoup plus intenses qu'il faudra traiter dans le cadre de DESIR@Spiral2, il est nécessaire d'atteindre des valeurs de champs 1000 fois plus élevées.

1.4 La conception

Dans cette partie, nous allons présenter les concepts sur lesquels se basent le développement de ce dispositif ainsi que les résultats des premières simulations réalisées.

1.4.1 Les travaux antérieurs

Le point de départ est une étude menée à l'université McGill [4][6].

La structure quadrupolaire a une longueur d'environ un mètre. Le rayon interne n'est, quant à lui, que de 3 mm (fig. 1.5) ce qui est plus petit que dans le cas de la plupart des dispositifs actuellement en fonctionnement[2]. C'est un point crucial qui permettra d'obtenir les valeurs de champs nécessaires au confinement des faisceaux intenses.

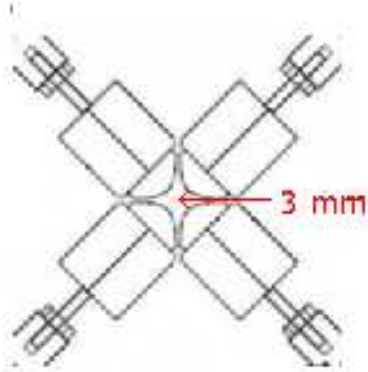


FIG. 1.5 – Section transverse du refroidisseur haute intensité

Le second point concerne l'électronique de puissance (fig. 1.6). Actuellement, il est possible d'obtenir des tensions de l'ordre de quelques centaines de volts pour une fréquence de 1MHz, le tout avec une puissance raisonnable puisqu'il ne faut pas détruire les composants. Dans le cadre de ce refroidisseur, l'objectif sera d'obtenir des potentiels de 10kV à une fréquence de 15MHz mais avec une puissance du même ordre ($< 1\text{kW}$). L'une des voies explorées est l'utilisation de circuit résonnant.

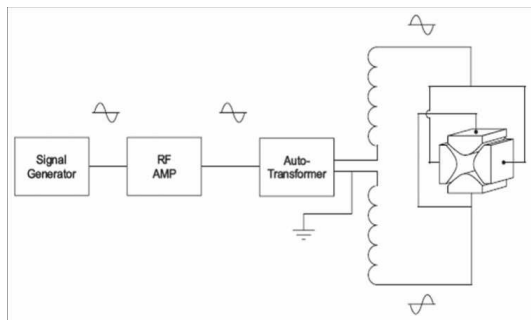


FIG. 1.6 – Schéma de principe de l'électronique

1.4.2 Les premiers résultats

Les premières études concernent l'étude du refroidissement des ions au sein de ce dispositif.

La première approche qui a été utilisée est la modélisation du refroidissement par frottement visqueux [7] :

on remplace les collisions ion-neutres par une force de frottement continue.

$$v(t + \Delta t) = v(t) \cdot \exp\left(\frac{-e \cdot \Delta t}{m \cdot K}\right)$$

avec :

- e , la charge élémentaire
- m , la masse de l'ion
- K , le coefficient de mobilité des ions ([8], [9])

C'est une approche macroscopique qui est à la fois très simple, très élémentaire, très rapide en terme de calcul et très facile à implémenter dans le logiciel SimIon [10]. Cependant, elle est très optimiste tant en terme de transmission qu'en terme de refroidissement (absence de déviation, d'échange de charge entre les ions et les atomes de gaz, etc...).

La transmission totale du dispositif est de l'ordre de 90%. La dispersion en énergie transverse est réduite d'environ 19eV à approximativement 30meV. Quant aux diagrammes d'espace de phases (fig. 1.7), ils montrent qu'une émittance de $75 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ est ramenée à $1.75 \cdot 10^{-2} \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ à la sortie du dispositif.

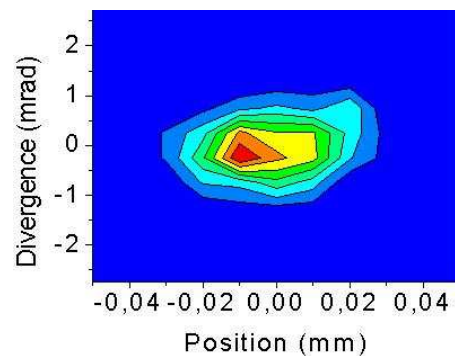
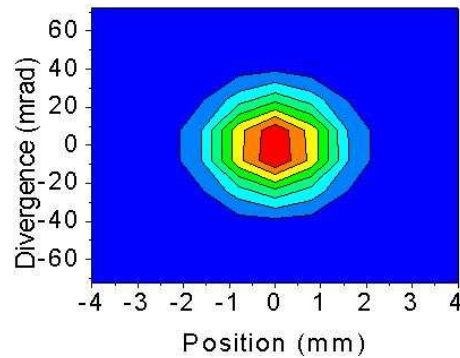


FIG. 1.7 – Diagramme d'espace de phase (*en haut*, l'état initial ; *en bas*, l'état final)

Néanmoins, il est nécessaire d'utiliser une approche microscopique dite "du potentiel réaliste" : cette modélisation prend en compte directement l'interaction ion-atome et d'avoir des résultats quantitatifs plus proche de la réalité. L'espace de charge sera lui aussi pris en compte.

1.5 Conclusions-Perspectives

L'utilisation de courants de plus en plus intenses et la nécessité d'accroître la sensibilité des expériences par une meilleure préparation du faisceau demandent toujours plus de développements instrumentaux qui, dans notre cas, concernent un refroidisseur radiofréquence de faisceaux de haute intensité capable de réduire l'émission à des valeurs faibles.

L'année 2007 sera consacrée aux simulations et à la conception du dispositif. En parallèle, des tests seront effectués sur certains composants déjà construits au CSNSM d'Orsay. Enfin, la construction du dispositif est prévue en 2008.

Remerciements

Tout d'abord, ce travail se fait au sein d'une collaboration LPC/CSNSM que je tiens à remercier. Et, bien entendu, un grand merci aux organisateurs des Rencontres Jeunes Chercheurs pour leur sympathie et leur disponibilité.

Références

- [1] The DESIR Facility, letter of Intent for Spiral2 (2006)
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/RFQ_Beam_Cooler
- [3] P.H. Dawson, "Quadrupole mass spectrometry and its applications", American Vacuum society classics (1995)
- [4] R. Lambo, "An electrostatic decelerator for a high-field radiofrequency quadrupole ion guide beam cooler" (2005), Msc Thesis, McGill University
- [5] I. Podadera, "New developments on preparation of cooled and bunched radioactive ion beams at Isol-facilities : the Iscool project and the rotating wall cooling" (2006), PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya
- [6] O. Gianfrancesco, "Ion dynamics in a linear high field RFQ trap" (2005) PhD thesis, McGill University
- [7] D. Lunney & al, Int. J. Mass Spectr. 190/191 (1999) 153-160
- [8] H.W. Ellis & al, Atomic Data and Nuclear Data Tables 22, 179-217 (1978)
- [9] L.A. Viehland & al, Atomic Data and Nuclear Data Tables 60, 37-95 (1995)
- [10] Idaho National Engineering and Environmental, Simion 7.0 (2000)